

画像計測技術を用いた単孔式地下水流向流速計の開発と現場実験

A Study on Measurement of Groundwater Flow in a Single Borehole by Image Processing Technique

小林 薫^{*1} 松元 和伸^{*1}
Kaoru Kobayashi Kazunobu Matsumoto

熊谷 幸樹^{*1} 松田 浩朗^{*1} 近久 博志^{*2}
Kouki Kumagai Hiroaki Matsuda Hiroshi Chikahisa

【要旨】

本論文は、原位置において単孔式で3次元的な地下水流動の流向・流速を的確に測定するための、Self Calibration法を用いた重複画像標定問題の解析方法について示す。次に、現場計測結果を基にCCDカメラとプリズムを組み合わせて試作した光学式流向流速計の現場適用性について検討した。その結果、試作した光学式流向流速計を用いて提案した画像処理を行えば、画像計測によりボーリング孔を過ぎる地下水流動の原位置3次元流向流速を十分な精度で測定可能であることが確認できた。

【キーワード】 地下水 単孔式 3次元調査 CCDカメラ 精密写真測量

1. はじめに

地盤環境問題に関心が集まる中、地下水に係わる問題が注目されている。土壌・地下水汚染問題においては、現状では汚染物質の輸送経路として地下水のみが評価の対象になっており¹⁾、汚染源の推定や将来の影響検討を行う上で、現状の地下水がどのように流動しているかを精度良く把握することが重要である。このため、原位置における地下水流動の流向流速測定は、環境保全・環境修復の分野において透水試験より重要視されている²⁾。特に、地下水に溶出している状態の水溶性流体は、遅延効果が小さく汚染物質が地下水流動とともに移動するため、帯水層中の地下水流動を正確に把握することが必要である。

一方、原位置における地下水流動の流向流速測定は、経済的で測定時間が比較的短く、測定精度も向上している単孔式による測定方法が多用されている。しかし、現状のボーリング孔を利用した単孔式流向流速測定方法^{2),3)}は、水平流の流向流速測定しかできないため、原位置における複雑な3次元挙動を示すような地下水流動の流向流速測定は困難である。このことから、近年特に大きな問題になっている土壌・地下水汚染などの地下水問題を解決しようとする場合、これまでに開発・改良されてきた地下水流向流速測定法で「十分満足するものが得られているのであろうか」と言う疑問が残る。

こうした背景に対して、最終処分場などの計画時や供用中の維持管理（将来の影響予測、対策工の評価など）における影響予測精度の向上などを図るため、原位置における多様で複雑（3次元）な地下水流動を正確に測定するための流向流速測定方法の確立が望まれる。

本報文は、従来の測定器では測定不可能であった孔内で3次元的な地下水流向流速を測定するための光学式流向流速計を現場に適用し、3次元流向流速測定による精度向上について検討した結果について報告する。

2. 土壌・地下水汚染問題における流向流速測定の必要性

「建設工事で遭遇する地盤汚染対策マニュアル（暫定版）」では、主にリスク管理型の措置について示されており、措置を実施するための具体的な方法として「覆土・敷土工法」、「遮水壁工法」、「固化・不溶化工法」および「バリア井戸工法」の4工法を挙げている。

この中で、例えば図-1に示すように遮水壁工法（浮き型）では、遮水壁付近の3次元的な地下水流動の把握が重要であり、また、バリア井戸工法では汚染された地下水の下流側で揚水し、汚染の拡散を防止することから、地下水の流向を基に適切な井戸

1. 防災 R&D センター 技術研究所 2. 山口大学 地域共同研究開発センター

配置が必要となる。さらに、原位置封じ込めの場合は、事後の維持管理として周辺への汚染拡散の監視のためのモニタリングが必要である。モニタリングのための井戸の位置は、「地下水の上下流側各1カ所以上とする」とされているが、設置にあたっては地下水の流向流速を正確に把握しておく必要がある。このように地盤環境問題における地下水流動の流向流速は、施設の計画時及び維持管理上の長期モニタリング計画時において重要な要因の1つである¹⁾。

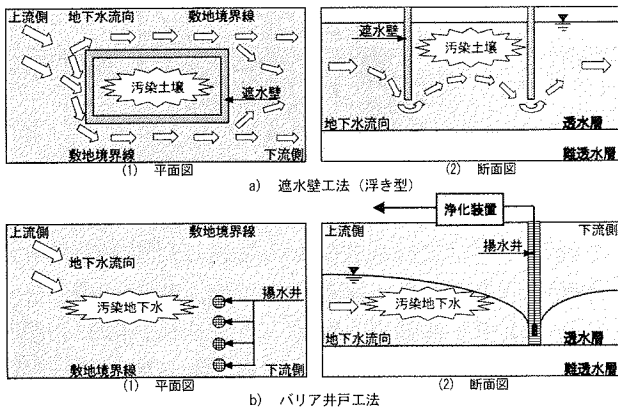


図-1 汚染拡散防止措置例と地下水の流れ^{5),6)}
(平面図加筆)

3. 光学式流向流速計の概要と測定手順

3.1 光学式流向流速計の概要

開発した光学式流向流速計の本体部概要を図-2に示す。本体部(検知部, 地下水通過部及び照明部), 電力・画像伝送用ケーブル, 孔内の上下流を抑制するために設けた整流板および固定用パッカー等から構成され, 取得画像は地上部に連結しているパソコンに順次取得・保存する。

写真-1には本測定システム(①~⑤)の構成を示す。

- ① CCDカメラとプリズムを組み合わせた方位計内蔵の光学式流向流速計本体部
- ② 本体部の上げ下げを機械的に行うケーブル巻き取り装置(深度表示あり)
- ③ 取得画像表示および画像保存用パソコン(画像解析用ソフトおよび方位・深度表示ソフト内蔵)
- ④ 微量押し出し調整機能を有している(清水用の)トレーサ投入装置
- ⑤ 本体部を所定深度に固定するパッカー用のコンプレッサー(圧力計あり)

3.2 測定手順

測定手順は, 図-3に示すようにボーリング孔に定方位ロッド(内蔵型方位計でも可能)と連結し

た本体部を挿入し, 固定用パッカーで所定深度に固定する。そして, 必要に応じて固体トレーサ(樹脂と重質炭酸カルシウムを主成分とし, 配合比を変え

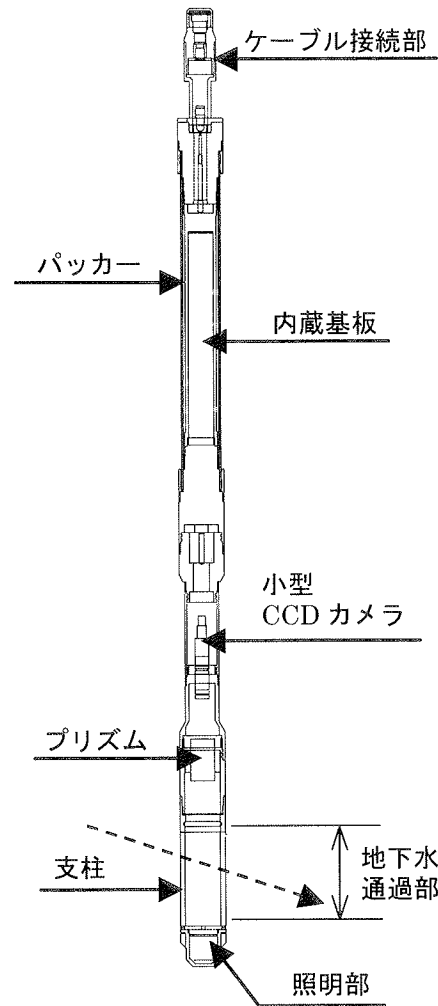


図-2 光学式流向流速計の本体部概要

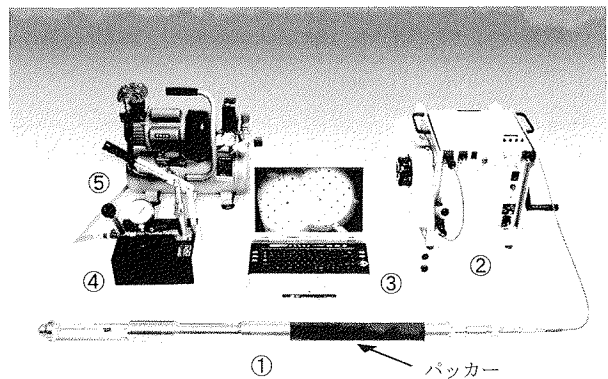


写真-1 光学式流向流速測定システム

て密度調整した乾燥密度 $\rho \approx 1.008 \text{ t/m}^3$, $\phi 0.5 \text{ mm}$ 程度の白色粒子)を投入し, 地下水流動が定常状態になった後, 初期画像を取得する。静置状態のまま任意時間後に順次画像を取得する。取得した各ステレオ画像をSelf Calibration法⁷⁾で画像解析すること

により、初期時刻 t_1 と任意時刻 t_2 (移動後) の固体トレーサの各3次元座標を算出し、その座標差から任意時間における移動量と方位を基に移動方向を求め、地下水流動の3次元的な流速 ($v=L/(t_2-t_1)$) と流向を同時に算出する。なお、必要に応じて本体部を順次上下方向に移動させ、前記手順で異なる深度の流向流速測定を行う。

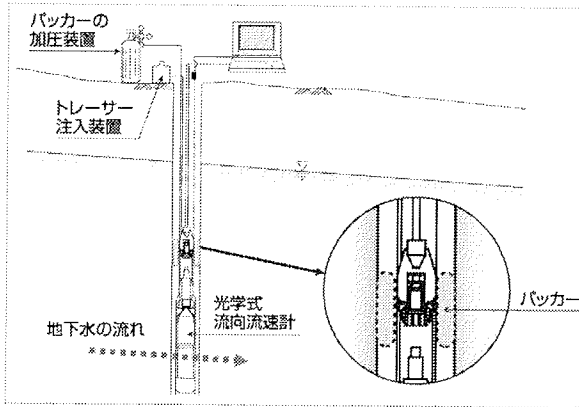


図-3 光学式流向流速測定システムの設置イメージ

4. 現場適用とその考察

4.1 地質および地下水位の概要

試験地の地質構成は、図-4に示すように埋土の直下より第四紀完新世の沖積層(上位より腐植土、砂層・中砂、レキ混じり粗砂、砂レキおよびレキ混じり粗砂)とGL -16.5m以深の更新世の洪積層(砂層・中砂および砂レキ)が分布している。また、地下水位は、GL -2.1mで腐植土層中に存在している自由水(平均水温 $\approx 17^{\circ}\text{C}$)である。

4.2 測定概要

試験地での測定は、地下水流動の比較的大きいと予想されるGL -11.0m付近の砂レキ層を対象に、光学式流向流速計による流向流速と比較検討のためにダルシー則と良く一致するとされている塩水を用いたポイントダイリューション法による流速測定を実施した。なお、3次元的な流向流速測定の検証のため、現場における地下水流動は、自然地下水流ではなく揚水により鉛直方向成分の流れを含む3次元的な地下水流動場をつくった。観測井に用いたスクリーンは、測定対象位置の砂レキ層に長さ1m、開口率30%以上⁸⁾の水平連続Vスロット型巻き線を設置した。

4.3 地下水流向流速測定の結果と考察

光学式流向流速計およびポイントダイリューション法による現場測定結果について以下に示す。

写真-2は光学式流向流速計を用いて(プリズム

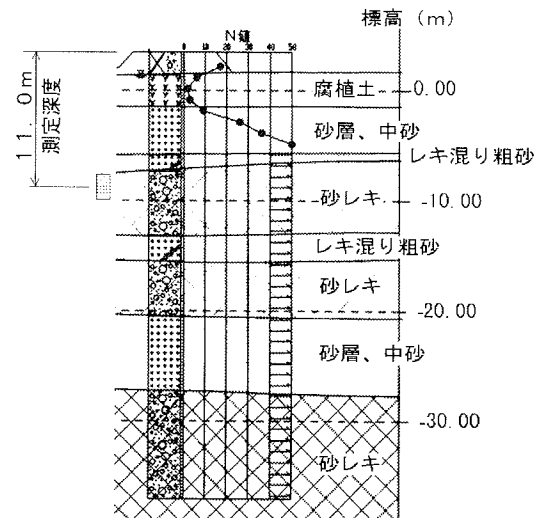


図-4 代表的なボーリング柱状図

を通して)、左右2方向から撮影した視差の異なる画像を示す。また、写真-2には、時間経過とともに地下水を移動する固体トレーサ(○印内)と照明部上面に配置した解析時に必要となる標点群(□印内:各標点間の相対距離は既知)を示す。また、ボーリング孔を過ぎる地下水流は図-5に示すような複雑な挙動を示す⁹⁾。したがって、画像解析時には、できる限りボーリング孔の中心付近を通過している固体トレーサを選定して処理を実施した。

表-1には、光学式流向流速計で取得した各画像を用いて前述したSelf Calibration法により解析を行い固体トレーサの3次元座標を求め、任意時間における固体トレーサの移動量と方位を基にした方向から流速と流向を同時に算出した結果を示す。

地下水流速の測定結果は、従来の水平流として評価した地下水流速と本流向流速計の大きな長特である3次元流速測定結果を示す。なお、現場作業工程等から実験に伴う現場内への立入り可能時間が制限されたため、流向流速測定の測定回数は少ないが、地下水流速の測定結果は多少ばらつきがあるものの鉛直方向成分の流れが測定され、3次元的な地下水流動の評価が可能である。今回の測定結果では、鉛直方向成分を無視した水平流としての評価結果(表-1の①)に比較して、鉛直方向成分を加味した3次元流速(表-1の②)は、最大で10%程度大きく評価されることがわかる(3回目)。なお、秋林ら⁹⁾のボーリング孔を過ぎる地下水の流れに関する研究を基に換算した地盤内の地下水流速の平均値($V \approx 7 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$)は、厳密には水平流として評価したポイントダイリューション法の流速測定結果($V_p = 6.0 \times 10^{-1} \text{ cm/s}$; 図-6の●-●区間より算出)と単純に比較することは難しいものの良く一致しており、光学式流向流速計によるボーリング孔内の3次元流

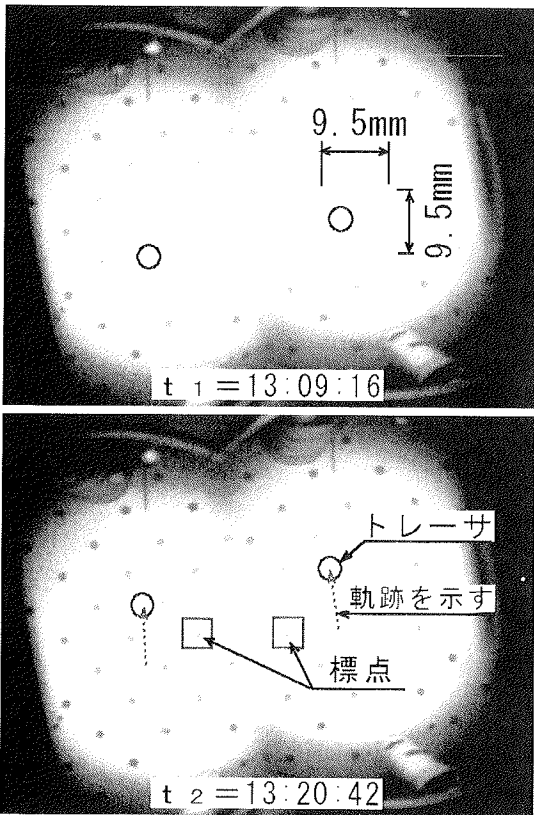


写真-2 測定時に取得した画像例

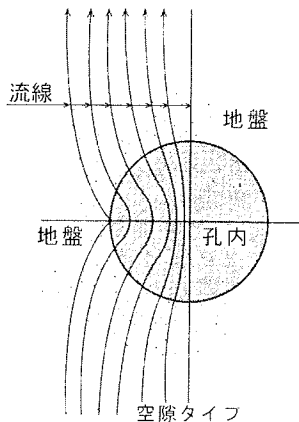


図-5 空隙タイプの孔内流線イメージ⁸⁾

速を概ね評価することが可能と考えられる。

地下水流向については、揚水量を定量的に測定しなかったために、地下水流速を同時に比較検討することができないが、水平面に関しては図-7に示すように全体的には西南西方向（平均流向= 247°）への流れをとらえており、揚水井と観測井の平面的な位置関係にはほぼ一致していた。また、鉛直方向成分の地下水流向は、図-8に示す軸対象浸透流解析によるシミュレーション結果を基に、測定位置付近の流速ベクトルと現場測定結果（地下水流向）を比較した（表-2）。

その結果、5回目の測定結果を除き地下水流向は、

水平連続Vスロット型巻き線のストレーナ構造の影響により浸透流解析の結果に比較して角度が小さくなったものと考えられるが、軸対象浸透流解析結果と類似した上向き方向成分を有する地下水流向が得られた。

以上の現場実験によるボーリング孔内の流向流速測定結果から、開発した光学式流向流速計を用いることで、これまで困難であった単孔式による地下水流動の3次元的な流向と 10^{-1}cm/s (10^{-6}m/s) レベルの3次元流速測定が十分可能であり、3次元的な地下水流向流速測定による精度向上が可能であることを確認した。

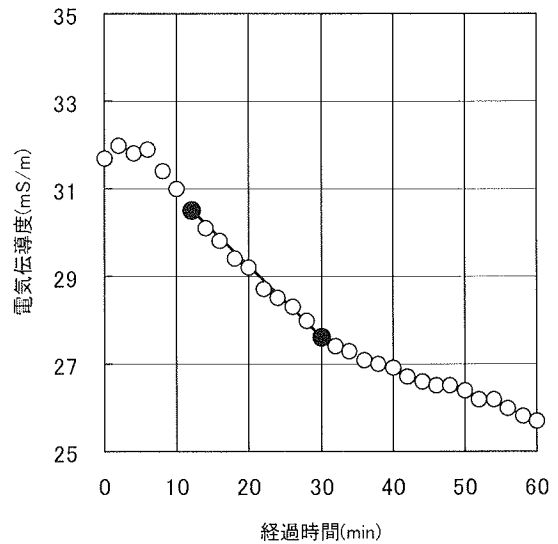


図-6 電気伝導度と経過時間との関係

5. おわりに

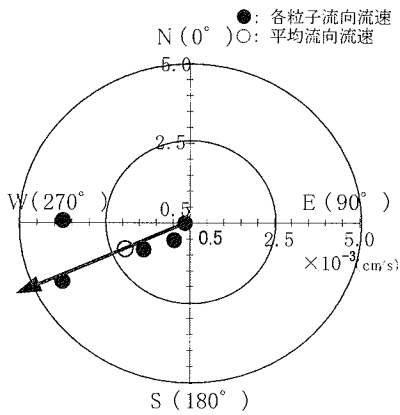
今後、開発した光学式流向流速計の完成度を更に高めた上で、多様で複雑（3次元的）な流れを示す地下水流向流速を正確に測定し、処分施設から漏出する汚染物質の地下水流動に伴う移行範囲の予測・評価の精度向上を図るなど、地盤環境問題における各種地下水（汚染）調査の精度向上に活用し、市民生活の快適・安全性向上に寄与して行きたいと考えている。

謝辞：本報文をまとめるに際して、現場実験にご協力頂きました飛鳥建設株式会社 花室 稔氏およびポイントダイリューション法による現場測定に多大なご協力頂きました東邦地水株式会社に謝意を表します。

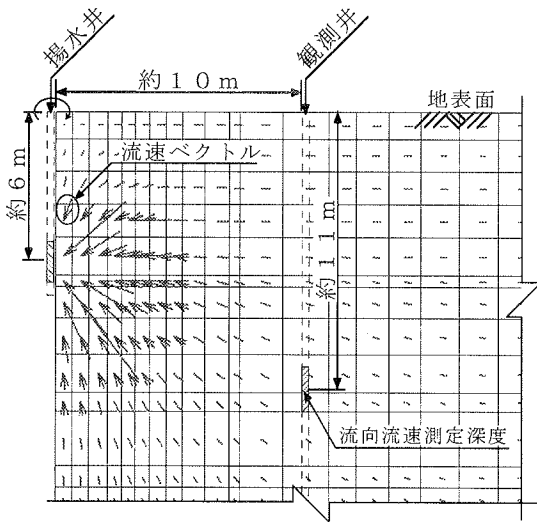
表一 光学式流向流速計による孔内流向流速測定結果

測定	トレーサーの移動量(mm)			①水平(XY面)流速	②3次元流速	②/①×100 比率(%)	流向 (°)
	X方向	Y方向	Z方向	平均(cm/s)	平均(cm/s)		
1回目	-1.03	9.83	3.29	1.44×10^{-4}	1.51×10^{-4}	105	264
2回目	0.13	9.79	3.00	3.76×10^{-3}	3.94×10^{-3}	105	271
3回目	-16.65	14.20	10.00	7.15×10^{-4}	7.86×10^{-4}	110	220
4回目	-4.21	6.82	1.60	1.60×10^{-3}	1.64×10^{-3}	103	238
5回目	-5.85	12.05	-1.63	4.19×10^{-3}	4.22×10^{-3}	101	244
平均流速＝				2.08×10^{-3}	2.15×10^{-3}	105 (平均)	247 (平均)
地盤内の実流速＝				6.94×10^{-4}	7.16×10^{-4}		

注1)Z方向(ボーリング軸方向)は、-が沈降方向を示す。また、流向については、270°が西方向を示す。
 注2)地盤内の実流速(=V)は、文献9)を参考に厳密な値ではないが1/3×平均流速とした。



図一 7 流向流速測定結果(水平面)



図一 8 軸対象浸透流解析による結果(鉛直面)
(揚水井と観測井を結んだ断面)

表一 2 地下水流向の結果比較(鉛直面)

測定	地下水流動の鉛直方向の流向	浸透流解析による鉛直方向の流向	備考
1回目	18.4°	27.5°	流速ベクトル
2回目	17.0°		
3回目	24.6°		
4回目	11.3°		
5回目	-6.9°		

【参考文献】

- 1) 嘉門雅史：地盤汚染の修復，土と基礎，Vol.50，No.10，pp.1～3，2002.
- 2) 張銘・遠藤秀典・高橋学：原位置浸透流測定法について(その2)，応用地質，Vol.42，No.1，pp.52～59，2001.
- 3) 地盤工学会：地盤調査法—地下水流速流向測定—，pp.334～337，1995.
- 4) 平山光信：調査・予測・モニタリング技術総論，土木技術，Vol.58，No.10，pp.59～68，2003.
- 5) 恒岡伸幸・小橋秀俊・古本一司：建設工事で遭遇する地盤汚染対応マニュアル(暫定版)，土木技術，Vol.58，No.10，p.43，2003.
- 6) 山本博之・大塚誠治・岩本晃敏：土壌汚染対策技術総論，土木技術，Vol.58，No.10，p.87，2003.
- 7) Okamoto, A.: The Model Construction Problem Using the Collinearity Condition, Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, Vol.50, No.6, pp.705～711, 1984.
- 8) 小松田清吉：流速・流向の測り方，地質と調査，No.3，pp.21～27，1990.
- 9) 秋林智・金森禎文・魏青：ボーリング孔を過ぎる地下水の流れに関する数値解析，地下水学会誌，Vol.36，No.4，pp.439～450，1994.

Summary This paper discusses a method of measuring the direction and velocity of groundwater flow using a CCD camera and a prism to economically and accurately identify the three-dimensional groundwater flow by single boring. In this study, the accuracy of measurement was also verified based on the results of monitoring on site. As a result, it was found that the proposed method enabled the measurement of the direction and velocity of three-dimensional groundwater flow in a single borehole by an image processing technique with great accuracy.

【Keywords】 groundwater, 3-D, single boring method, CCD camera, precise photogrammetry

*本報文の一部は、2005 土壌・地下水浄化技術セミナーにおいて口頭発表（平成 17 年 9 月）